

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之五/“新技术”分栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.005

揣君, 项鹏飞, 许启铿, 等. 粮食库存数量动态监测技术研究现状与进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 33-40.

CHUAI J, XIANG P F, XU Q K, et al. Research status and progress of dynamic monitoring technology of grain stock quantity[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 33-40.

粮食库存数量动态监测技术研究现状与进展

揣君¹, 项鹏飞², 许启铿³✉, 吴文福⁴, 袁庆利⁵,
吴强³, 刘永超⁶, 周志耀⁶

- (1. 郑州工业应用技术学院 建筑工程学院, 河南 郑州 451100;
2. 温州市粮食和物资储备局, 浙江 温州 325000;
3. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;
4. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;
5. 郑州工大粮安科技有限公司, 河南 郑州 450001;
6. 河南工大设计研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 粮食库存数量动态监测技术已成为粮食仓储管理新的技术需求。在粮食库存数量静态监测技术现状的基础上, 分析提出动态监测技术的难点问题, 重点介绍了动态库存数量监测在三维测量装置开发、超大型粮堆多测站数据采集及融合技术、不规则粮堆高精度体积算法、复杂异型粮堆平均密度取值方法、集成管理软件平台等方面的研究进展及应用。粮食库存数量动态监测系统测量误差小于2%, 满足使用要求, 为粮食行业仓储业务信息化管理和数字化转型发展提供了技术支撑。

关键词: 粮食数量; 动态监测; 不规则粮堆; 测量装置; 粮堆平均密度

中图分类号: S-03; TS205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2023)02-0033-08

网络首发时间: 2023-03-10 09:59:22

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.1004.010.html>

Research Status and Progress of Dynamic Monitoring Technology of Grain Stock Quantity

CHUAI Jun¹, XIANG Peng-fei², XU Qi-keng³✉, WU Wen-fu⁴, YUAN Qing-li⁵,
WU Qiang³, LIU Yong-chao⁶, ZHOU Zhi-yao⁶

- (1. School of Architecture Engineering, Zhengzhou University of Industrial Technology (ZUIT), Zhengzhou, Henan 451100, China; 2. Wen Zhou Food and Strategic Reserves Administration, Wenzhou, Zhejiang 325000, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 4. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China; 5. Zhengzhou Gongda Grain Security Technology Co., LTD, Zhengzhou, Henan 450001, China; 6. Henan University of Technology Design and Research Academy,

收稿日期: 2022-12-30

作者简介: 揣君, 男, 1985年出生, 博士, 讲师, 研究方向为储仓结构及仓储智能化。E-mail: chuai-jun@163.com.

通讯作者: 许启铿, 男, 1981年出生, 博士, 高级实验师, 研究方向为储仓结构及仓储智能化。E-mail: xuqikeng@haut.edu.cn.

Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Dynamic monitoring technology of grain inventory quantity has become a new technical demand of grain storage management. On the basis of the current situation of static monitoring technology of grain stock quantity, the difficulties of dynamic monitoring technology were analyzed and put forward. This paper mainly introduced the research progress and application of dynamic inventory quantity monitoring in the development of three-dimensional measuring device, data acquisition and fusion technology of multi-measuring stations of super large grain piles, high precision volume algorithm of irregular grain piles, average density evaluation method of complex heterogeneous grain piles, integrated management software platform and so on. The measurement error of the developed dynamic monitoring system for grain inventory quantity was less than 2%, which meet the application requirements. This new technology provides the technical support for the information management and digital transformation development of grain storage business.

Key words: grain quantity; dynamic monitoring; irregular grain pile; measuring device; average density of grain pile

粮食库存数量是仓储管理的重要数据, 及时掌握准确粮食库存数据是保障国家储备粮“数量真实”和国家粮食安全的基本要求^[1]; 对于粮食加工和收储交易企业, 实时获取准确的粮食实物库存数据, 是其生产经营和财务核算的重要数据支撑。因此, 基于自动化和信息化的粮食库存数量实时在线监测关键技术及设备研发已然成为迫切需要。

随着物联网信息技术的快速发展和粮食行业数字化转型的实际需求, 粮食加工企业急需对进出粮作业全过程进行库存数量动态盘点, 实现全过程“穿透式”在线监管。与传统储备粮储藏期内静态管理条件下粮食库存数量监测技术相比, 进出粮作业过程中散粮堆形态呈现不规则、作业频繁等特点, 对其库存数量动态监测技术提出了更高要求, 面临诸多技术难题急需解决。本文在简要介绍粮食库存数量静态监测技术基础上, 综述分析动态监测技术及存在的一些难题, 并重点阐述作者研发团队在该方面新的研究进展, 旨在为粮食库存数量动态监测领域提供技术支持。

1 粮食库存数量监测研究现状

1.1 静态监测

随着粮食行业“四散”作业的不断发展, 粮食储藏绝大多数是以散体物料堆的形式存放, 国家储备粮也要求以平整规则粮堆形态储藏^[2]。为

了全面掌握储备粮库存的真实数量, 每年各级粮食主管部门均需花费大量的人力物力, 历时数月进行全国范围内的粮食实物现场大清查。长期以来, 主要采用人工现场丈量的方式, 效率低下, 数据严重滞后, 监管被动, 无法实时掌握储备粮库存数量, 亟需采用先进信息技术手段, 建立储备粮库存数量网络实时监测技术, 提升粮食数量监管的智能化和信息化水平。

因此, 围绕粮食库存数量监测关键技术问题, 相关研究人员采用超声波测距技术^[3]、压力传感器^[4-5]、探地雷达^[6-7]、激光测距传感器^[8-9]、三维激光扫描仪、图像识别等不同技术路线开展了系列研究。其中, 超声波测距由于其辐射角较小, 只适合用作料位开关(如图 1), 无法用于定量测量; 由于粮食散体自身力学性能和粮堆底部压力分布不均匀性和随机性的特性^[10-11], 采用压力传感器方式进行粮食库存数量监测存在不足; 探地雷达测试过程操作繁琐(如图 2), 测量精度低, 价格昂贵, 无法在粮食行业使用; 三维激光扫描仪逐渐用于煤炭和发电厂堆料以及露天矿散堆料的体积测量(如图 3), 由于其价格昂贵, 在国内仅有个别学者开展相关研究^[12-13], 然而此类产品主要是依靠国外进口, 系统复杂、价格昂贵(100~150 万元), 无法在数大量广的粮库库存数量测量中推广使用; 图像识别技术由于粮堆空间视角复杂多变, 目前也仅仅是处在探索研究阶段^[14]。

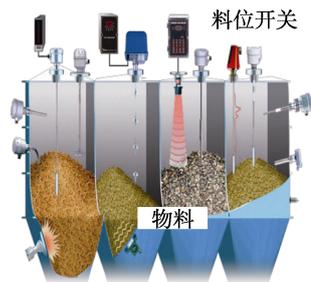


图 1 料位计示意图

Fig.1 Material level meter diagram

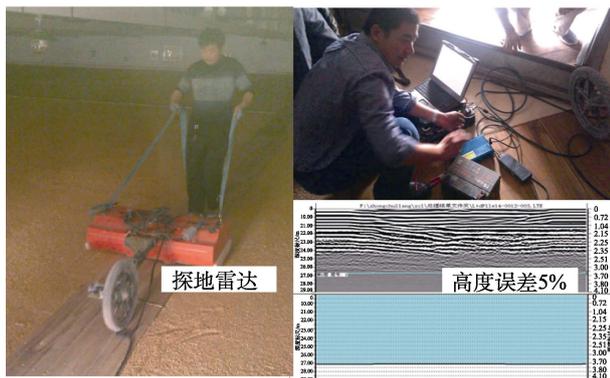


图 2 探地雷达粮堆厚度测试现场

Fig.2 Grain stack thickness test site by ground penetrating radar



图 3 三维激光扫描仪测量

Fig.3 Three-dimensional laser scanner measurement

综上, 经过综合技术比选, 结合粮食行业仓储业务特点, 采用激光测距技术并搭建三维转动平台的技术路线是可行的。本文作者科研团队围绕基于光电检测的储备粮库存数量监测关键核心技术, 开展深入系统的科技攻关与推广应用, 集成创新了具有完全自主知识产权的粮食库存数量网络实时监测系统^[15-17], 实现了储备粮库存数量远程在线监管, 该技术已在全国进行了良好的推广应用, 为国家粮食库存监管工作提供了新技术手段。

1.2 动态监测

近年来, 随着激光雷达技术在林业、气象、测绘、汽车、能源和考古等领域快速应用及发展,

基于海量点云数据的三维模型重建与分析方法不断成熟^[18]。激光雷达测量技术在散体物料库存数量动态监测的应用不断呈现, 已在大型煤堆体积测量等场景中得到良好应用。如何将激光雷达的技术优势应用于粮食库存数量的动态监测是值得关注的问题, 然而, 此类产品价格高昂, 核心技术仍受保护, 底层核心算法程序不具备友好的二次开发功能, 并且仅可获取体积数据, 无法精确计算库存数量。因此, 鉴于粮食仓储管理业务特点, 以及粮食特别是国家储备粮数据的保密安全性, 急需研发适用粮食行业具有完全自主知识产权的粮食库存数量动态监测技术。

2 动态监测技术难点及分析

粮食动态库存数量的监测不同静态储备, 存在散粮堆进出作业频繁、多为大型复杂异型粮堆、需要快速获取动态数据、粮堆平均密度取值等技术难点, 以下结合库存动态盘点需求, 进行动态监测技术难点的阐述与分析。

2.1 采集设备及配套轨道的高效测控技术

对于超大型复杂异型粮堆, 固定式设备无法实现对整个粮堆形貌区域的全覆盖, 会存在扫描测量死角。如何设计基于轨道式的采集设备, 实现设备沿着轨道自动行走、停靠测站、高效测控、采集数据及传输, 需要开发一套高效的采集设备及配套轨道测控技术。

2.2 大体积粮堆多测站与盲区采集及数据融合算法

面对动态进出粮过程中堆积实时形成的、随时空变化的多形貌大型粮堆, 如何设计多个测站支持全过程完整粮堆坐标信息的扫描采集, 消除采集盲区, 并进行各个测站的扫描数据及图形拼接融合, 是保证动态粮堆体积测量计算精度的关键, 需要研究专门算法以实现点云数据的有效融合及配准。

2.3 大体积复杂异型粮堆体积算法

对于动态监测的复杂不规则粮堆(如图4), 表面高低起伏较大且自然堆积形成大斜坡, 如何快速准确计算其体积, 需要构建专门的高效算法。

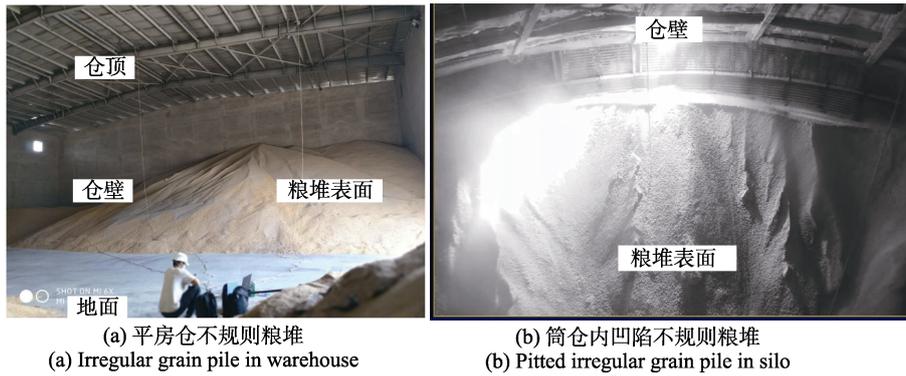


图 4 复杂不规则粮堆实景
Fig.4 Photo of complex irregular grain pile

2.4 复杂异型粮堆平均密度取值问题

粮堆平均密度是粮食库存数量监测和精度保证的重要参数。由于大型复杂粮堆形成诸多凹凸不平的不规则粮堆，与平整规则粮堆的堆积特性和沉降规律不同，使得按照平整规则粮堆的平均密度计算方法无法适用，需要专门进行实验研究和统计分析。

3 动态监测技术研究进展

针对粮食库存数量动态监测的技术需求及难点，本文作者科研团队研发了基于激光雷达的三维动态测量装置及相关算法，突破系列技术难题，形成自主可控的技术和软件系统。相关研究进展主要体现在以下几个方面。

3.1 三维动态测量装置研发

基于激光雷达搭载自主开发三维高精度转动平台，集成多信息源运动感知位置和路径的高精

度控制器，解决了底层硬件的高精度控制及协同工作难题，实现了海量数据的稳定存储、精确解析与高效传输。开发了三维动态测量装置（如图 5），同时，针对大体积复杂粮堆配套开发了轨道、移动行走小车及配套控制程序，形成了固定式和轨道式两种动态测量装置。

3.2 点云数据处理与分析

根据大型复杂粮堆体积算法的要求，需要将原始采集获得的点云数据的球坐标 (α, β, r) 形式进行坐标转换，转成空间直角坐标 (x, y, z) 的形式，如图 6 所示，测点坐标转换计算公式如下：

$$x = r \sin \beta \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = r \sin \beta \sin \alpha \quad (2)$$

$$z = r \cos \beta \quad (3)$$

上式中： α 是测量装置的水平转角， β 是测量装置的竖向转角， r 是激光测距值。

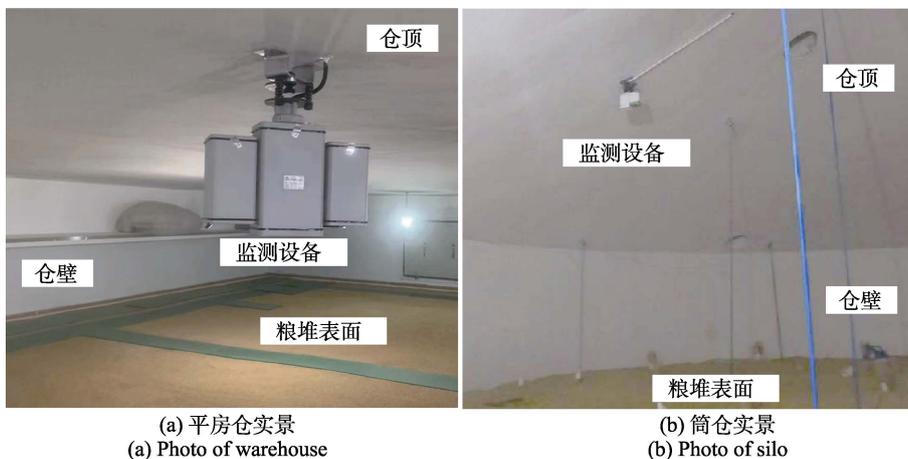


图 5 三维动态测量装置应用实景
Fig.5 Application of 3D dynamic measuring device

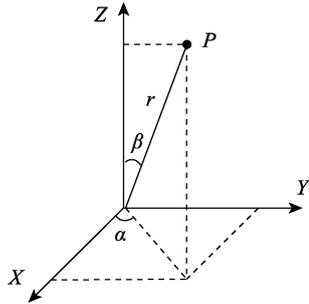


图 6 坐标系转换示意图

Fig.6 Coordinate system transformation diagram

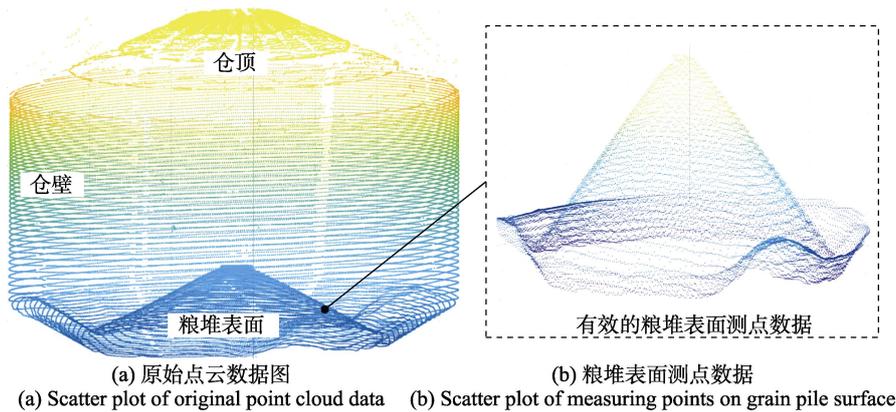


图 7 筒仓粮堆点云数据

Fig.7 Point cloud data of silo particulate grain pile

3.3 高精度散粮堆体积算法

基于快速高效的激光雷达获取粮堆形貌的海量点云数据,使得粮堆体积数学积分高精度算法成为可能。构建基于 Delaunay 三角化的高精度散粮堆体积算法,将粮堆表面测点数据三角化,每一个三角形往粮堆底部进行投影,然后将上、下两个三角形对应的角点依次相连,最终形成一个三棱柱;每一个三棱柱的底面积乘上顶面三个角点高度的平均值即为其体积,所有三棱柱的体积之和即为粮堆的总体积。实际应用表明,该算法计算的粮堆体积误差小于 0.5%,计算精度较高。

3.4 大体积粮堆测量盲区采集与数据融合拼接

对于超大型的粮仓,一个测站无法实现对整仓全覆盖测点扫描,存在较多测量盲区。为解决盲区的数据采集问题,采用轨道搭载动态测量装置的一体化技术方案,通过测量装置在轨道上行走并完成多个测站的数据采集,并通过数据融合和图形拼接技术,保证测量数据完整性和准确性。

选取某粮食加工厂区的一个存放稻谷的罩棚仓进行测试,该仓房长度 65 m,宽度 56 m,设

此外,测量装置扫描获取的整个视角范围内的测点数据,包含粮堆、仓壁、仓顶、测温电缆、异常点(噪声)等,如图 7(a)所示,为了获取粮堆体积计算的有效数据,利用边界条件以及粮堆自流角特性,建立了测点数据过滤规则,对非粮面测点进行剔除,需从原始的点云数据中筛选出有效的粮堆形貌表面的测点数据(如图 7(b)),保证粮堆体积计算精度。

计装粮线高度为 7.5 m,仓内有两排柱子,从两侧仓门进行出粮作业,设计沿仓房长度方向布置 2 条轨道,每条轨道上均匀设置 5 个测站,详见图 8 和图 9。选取出粮过程某一工况(如图 10)进行数据分析和结果计算,通过 10 个测站数据融合和图形拼接,获得该工况点云数据三维图如图 11 所示,可以看出与实际场景吻合较好,总体测量误差小于 1.5%,验证了技术稳定性和测量精度。

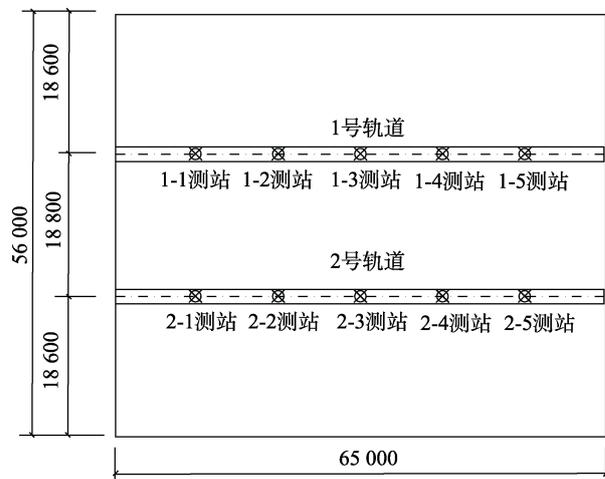


图 8 轨道布置平面图

Fig.8 Track layout plan



图 9 测试现场图
Fig.9 Photo of field test

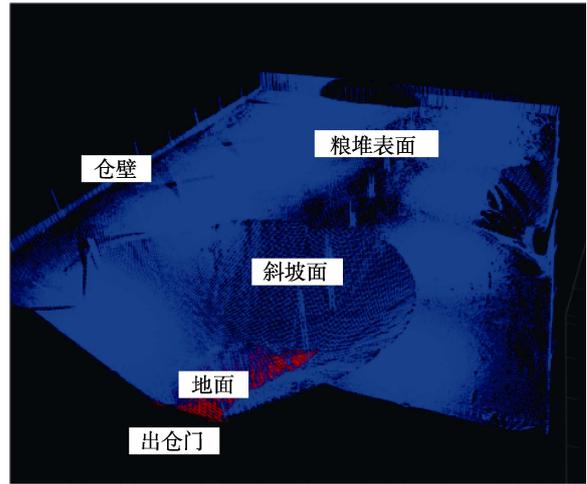


图 11 多测站图形拼接结果
Fig.11 Multi-station pattern mosaic results



图 10 粮堆实景
Fig.10 Photo of grain pile

3.5 超大粮堆平均密度计算模型

利用收集的大量样本数据，经过室内实验和现场实仓验证，统计分析建立了大体积复杂粮堆的平均密度模型。该模型综合考虑粮食品种、粮

堆高度、储藏时间、震动源、通风次数等多种因素，经过大量实仓测试的校验，适用性良好，避免了传统方式中存在的人工选取修正系数，大幅提高了粮食库存数量动态监测结果的客观性、科学性和可靠性。

3.6 动态库存数量监测管理平台

集成底层测控程序，采用 B/S 架构集成兼具网络实时的检测、监控、预警等功能，开发了动态粮食库存数量网络实时管理软件平台（如图 12），实时呈现进出粮过程粮堆点云 3D 图（如图 13），以及相应的数据统计和汇总相关报表，实现了动态粮食库存数量的远程在线自动测量、计算、自动汇总统计和实时上传。



图 12 数量监测软件平台
Fig.12 Software platform of quantity monitoring

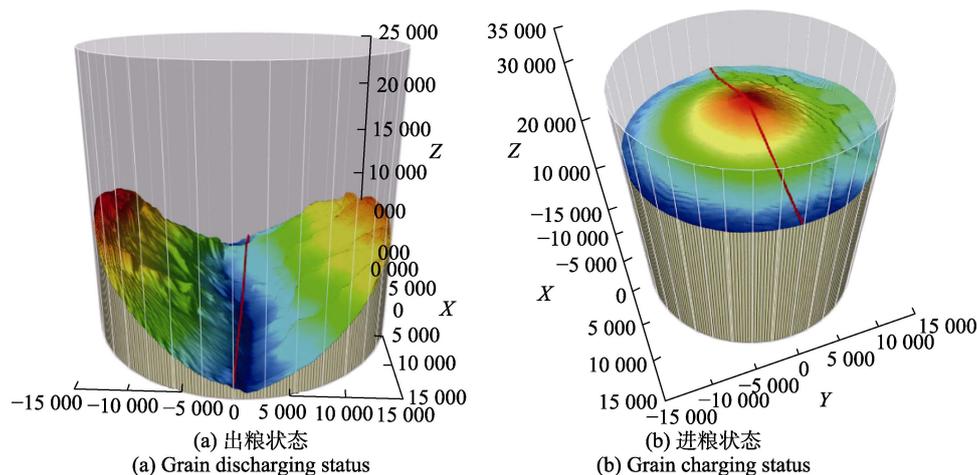


图 13 三维粮堆生成图

Fig.13 Three-dimensional grain stack generation diagram

4 结论

通过阐述当前粮食库存数量静态监测技术的现状,分析提出了动态库存数量监测技术难点问题。重点介绍了动态库存监测技术在三维测量装置开发、大体积粮堆多测站与盲区采集及数据融合技术、高精度体积算法、粮堆平均密度取值、集成管理软件平台等方面研发进展与技术应用,测量体积误差小于 0.5%,数量误差小于 2%,满足动态监测应用和精度要求,为粮食仓储业务信息化管理提供了先进技术手段,助力粮食企业数字化转型发展。

参考文献:

- [1] 魏强. 服务调控保障供应中储粮继续巩固“两个确保”[N]. 粮油市场报, 2008-01-18(1).
WEI Q. Service regulation to ensure the supply of grain storage continue to consolidate the “two guarantees”[N]. Grain and Oil Market News, 2008-01-18(1).
- [2] 任正晓. 粮食库存检查实务[M]. 北京: 中国商业出版社, 2007: 17-22+25.
REN Z X. Practice of checking grain stocks[M]. Beijing: China Commercial Press, 2007: 17-22+25.
- [3] 张福钊, 李成, 于海华, 等. 3D 雷达扫描技术在粮油行业料位监控中的应用研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(3): 50-51+54.
ZHANG F Z, LI C, YU H H, et al. Application research of 3D radar scanning technology in grain and oil industry material level monitoring[J]. Grain and Food Industry, 2020, 27(3): 50-51+54.
- [4] 张德贤, 张苗, 张庆辉, 等. 基于底面压强的粮仓储量估测

方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 287-294.

- ZHANG D X, ZHANG M, ZHANG Q H, et al. Granary storage quantity detection method based on bottom pressure estimation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 287-294.
- [5] 祝玉华, 陈军涛, 甄彤, 等. 储粮数量检测技术研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 116-122.
ZHU Y H, CHEN J T, ZHEN T, et al. Research progress of grain quantity detection technology[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 116-122.
- [6] 于素萍, 毛伟伟, 秦瑶. 基于探地雷达的粮仓探测技术研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 28(1): 133-135.
YU S P, MAO W W, QIN Y. Research on granary detection technology based on ground penetrating radar[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2015, 28(1): 133-135.
- [7] 秦瑶, 陈洁, 方广有, 等. 雷达层析成像技术对粮仓储量信息的探测[J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 66-72+201.
QIN Y, CHENG J, FANG G Y, et al. Detection of granary storage information by radar tomography[J]. Journal of radio science, 2010, 25(1): 66-72+201.
- [8] 吴才章, 许启铿, 王录民. 一种手持式粮食库存数量检测仪器的设计[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 107-112.
WU C Z, XU Q K, WANG L M. Design of a handheld grain inventory quantity measuring instrument[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 41(4): 107-112.
- [9] 丁孝银, 肖昭然, 许启铿, 等. 基于三维激光扫描技术的粮食库存数量监测应用研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 114-117.
DING X Y, XIAO Z R, XU Q K, et al. Application research of grain stock quantity monitoring based on 3D laser scanning technology[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural

- Science Edition), 2019, 40(3): 114-117.
- [10] 王录民, 刘永超, 许启铿, 等. 散粮堆底部压力实测研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 1-4.
WANG L M, LIU Y C, XU Q K, et al. Experimental study on bottom pressure of bulk grain pile[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(4): 1-4.
- [11] 许启铿, 揣君, 曹宇飞, 等. 散粮堆底部压力颗粒流数值模拟分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 126-130.
XU Q K, CHUAI J, CAO Y F, et al. Numerical simulation of bottom pressure of bulk grain pile by PFC[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 126-130.
- [12] 李鹏. 粮仓储量三维激光扫描快速测量技术研究[D]. 清华大学, 2010.
LI P. Research on rapid measurement technology for grain storage volume based on three-dimensional laser scanning[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [13] 谢颖. 基于三维激光扫描的粮仓储量测量中点云数据处理技术的研究[D]. 华东师范大学, 2016.
XIE Y. Research on point cloud data processing technology of granary reserve measurement based on three-dimensional laser scanning[D]. East China Normal University, 2016.
- [14] 宋立明, 李秀华, 李万龙. 基于计算机视觉的储备粮智能稽核方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2013, 31(1): 107-112.
SONG L M, LI X H, LI W L. Intelligent checking method of grain reserve based on computer vision[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2013, 31(1): 107-112.
- [15] 王录民. 一种粮仓仓容实时监测系统: 201310039446.0[P]. 2015-12-23.
WANG L M. Granary capacity real-time monitoring system: 201310039446.0[P]. 2015-12-23.
- [16] 王录民. 一种散体物料堆体积的测量装置: 201310039428.2[P]. 2015-08-05.
WANG L M. A device for measuring bulk bulk volume: 201310039428.2[P]. 2015-08-05.
- [17] 袁庆利. 一种粮仓、三维扫描数量监测设备及其回收置: 202010745602.5[P]. 2021-10-08.
YUAN Q L. Granary, 3D scanning quantity monitoring equipment and its recovery: 202010745602.5[P]. 2021-10-08.
- [18] 郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 等. 激光雷达森林生态应用—理论、方法及实例[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
GUO Q H, SU Y J, HU T Y, et al. Forest ecological application of Lidar—theory, method and examples[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。